

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КІН ТА КІНЕТИКИ ФОРМИ ПОВЕРХНЕВИХ ПІВЕЛІПТИЧНИХ ТРІЩИН В ОДНОРІДНОМУ ПОЛІ НАПРУЖЕНЬ ТА В ЗОНІ КОНЦЕНТРАТОРІВ

І.М. Підгурський, І.Б. Окіпний, М.Я. Сташків, І.В. Кенс

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

The modeling of semi-elliptical surface crack in the prismatic sample under tensile pressure was carried out based on the finite element method. A three-dimensional model of the sample with the global elements mesh, as well as the model of crack area with a local mesh with tetrahedral elements were developed. The values of SIF K_I along the contour of the semi-elliptical surface crack, well correlated with the known solutions, were obtained. The authors present the results of the study of stress intensity factors along the front of surface crack under uniaxial tension of finite size plate with stress concentrator and without it based on the finite element method. The development of shape of fatigue surface cracks are set.

Значна частина елементів машин і споруд мають конструкційні і технологічні концентратори напружень, які в умовах експлуатації можуть накопичувати пошкодження. Одним, з найрозповсюдженіших дефектів, що обмежують терміни безпечної роботи конструкцій є поверхневі півеліптичні тріщини. Особливо важливою ця проблема є для зварних конструкцій [1].

Для опису поведінки об'єктів, що мають поверхневі дефекти в зонах конструктивних концентраторів напружень необхідно враховувати сукупність таких факторів, як розподіл напружень по товщині елемента, форма дефекту та значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) по контуру поверхневого дефекту.

Відомо, що КІН дозволяє встановити взаємозв'язок між умовами навантаження матеріалу у вершині тріщини, а також з геометрією та напруженим станом тіла, що містить тріщину [2].

Досить мало даних про зміну форми поверхневих тріщин, що розвиваються в зонах концентраторів напружень, та про критерії, що описують цю кінетику. Зокрема, особливістю втомних пошкоджень зварних з'єднань є суттєве сповільнення швидкості розповсюдження розвитку наскрізної тріщини в глибину матеріалу при виході її вершини із зони концентрації напружень [3].

Похибки при встановленні конфігурації контуру суттєвим чином впливають на точність визначення КІН для тріщин з викривленим контуром і, як наслідок, на оцінку довговічності елементів конструкцій на стадії розповсюдження тріщин [4, 5].

У зв'язку з цим метою роботи є оцінка КІН в зонах концентраторів напружень у результаті моделювання елементів конструкцій з поверхневими тріщинами методом скінчених елементів (МСЕ).

Дослідження проводилися за методикою [6,11]. Застосовували спеціалізований програмний пакет "ANSYS Workbench" [7].

Моделювали зразки товщиною $t=20$ мм та шириною 80 мм з низьколегованої сталі 09Г2С з $\sigma_T=380$ МПа (рис. 1). Коефіцієнт Пуассона при пружному деформуванні $\nu=0,3$. Напруження розтягу складали 168 МПа. Валик представляє собою півциліндр радіусом 10 мм. Тріщина, що моделюється розташована на відстані 1,5 мм від основи концентратора.

Створено тривимірну модель зразка з глобальною сіткою елементів та модель області тріщини з локальною сіткою тетраедричних елементів. Розмір елементів глобальної сітки становить 2-3 мм, локальної 0,1 мм.

Скінчено-елементна модель півеліптичної тріщини в однорідному полі напружень представлена на рис. 2.

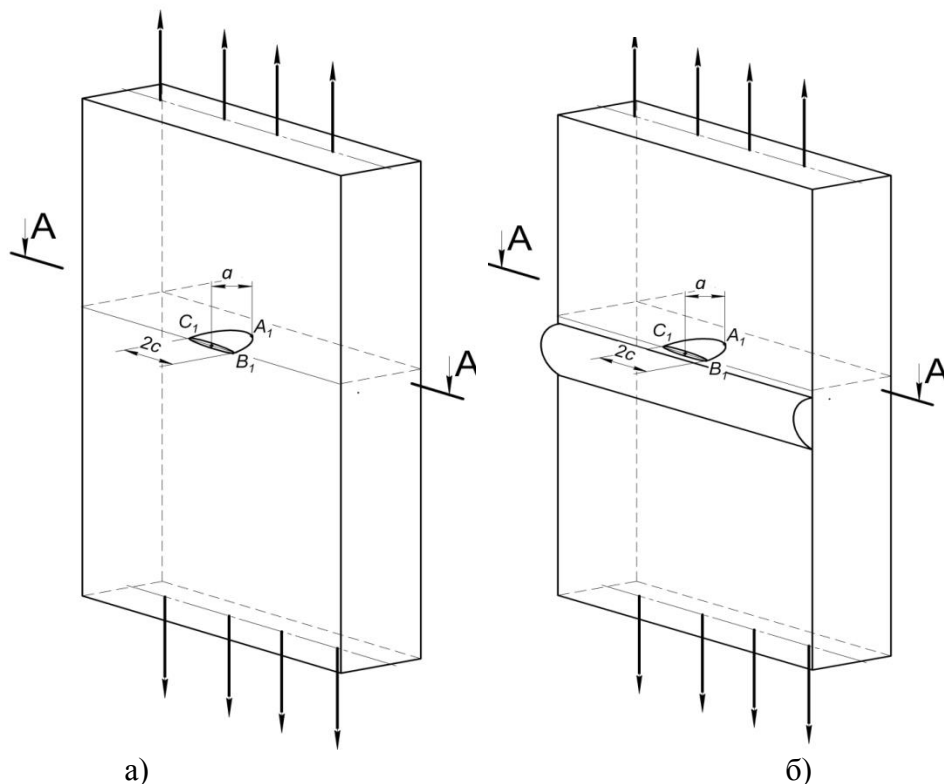


Рис. 1. Поверхнева півеліптична тріщина у пластині скінчених розмірів: а) в однорідному полі напружень; б) в зоні концентратора

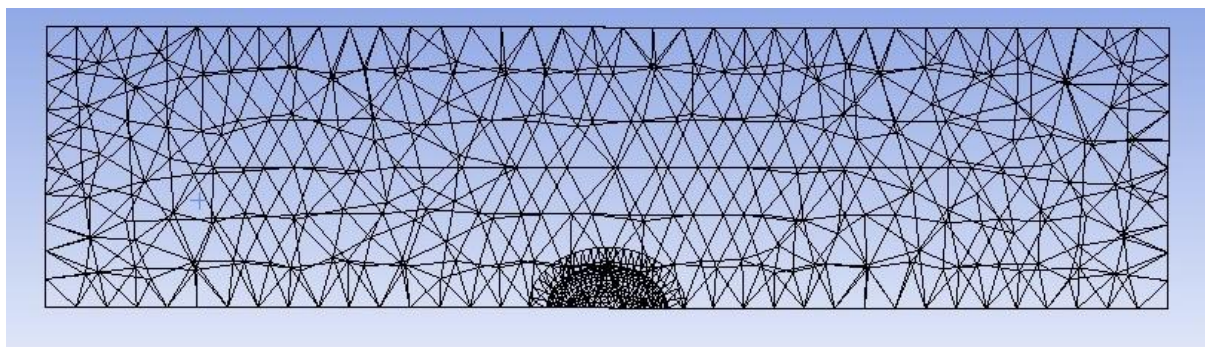


Рис. 2. Скінчено-елементна модель поверхневої півеліптичної тріщини в однорідному полі напружень.

У результаті обчислення МСЕ отримано значення КІН вздовж контуру поверхневої тріщини. На рис. 3 представлено результати моделювання поверхневої тріщини з півдіагоналями $a=3\text{ мм}$; $c=4,3\text{ мм}$; $a/c=0,7$; $a/t=0,15$, що розташовані в однорідному полі напружень (рис. 4,а) та в зоні концентратора (рис. 4, б).

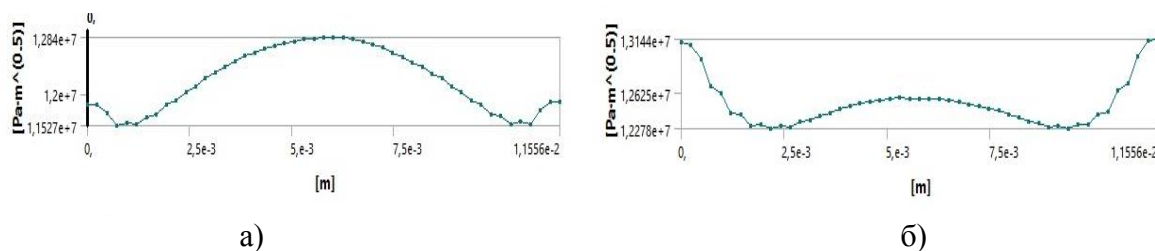


Рис. 3. Розрахунок КІН вздовж контуру поверхневої півеліптичної тріщини: $a=3\text{ мм}$; $c=4,3\text{ мм}$: а) в однорідному полі напружень; б) в зоні впливу концентратора.

Результати обчислених КІН для найглибших точок $K_{I,A}$ поверхневих півеліптичних тріщин та точок на поверхні зразка ($K_{I,B}$ та $K_{I,C}$) в однорідному полі напружень та в зоні концентратора представлено в табл. 1.

Табл. 1. КІН для характерних точок поверхневих півеліптичних тріщин в однорідному полі напружень та в зоні концентратора.

	σ_n , МПа	a , мм	c , мм	a/t	КІН, МПа·м ^{1/2}	
					$K_{I,A}$	$K_{I,B}$
Тріщина в однорідному полі напружень	168	3,0	4,30	0,15	12,84	11,84
Тріщина в зоні концентрації напружень	168	3,0	4,30	0,15	12,57	13,14

Порівнюючи результати оцінки КІН для характерних точок поверхневої півеліптичної тріщини, отриманими при моделюванні МСЕ (рис. 3, а, табл. 1) з даними, отриманими за залежностями Ньюмена-Раджу [8], варто зазначити, що для найглибшої точки розташованої на півдіагоналі a , відносна похибка значення КІН становить 0,93%, а для точок, розташованих на поверхні відносна похибка значення КІН не перевищує 1,82%. Порівняння отриманих даних свідчить про побудову якісної скінчено-елементної моделі поверхневої тріщини.

Порівняння значень КІН для найглибшої точки поверхневої тріщини та точок на поверхні для ідентичних поверхневих тріщин, розташованих в зоні концентрації напружень (рис. 3, б) та в однорідному полі напружень (рис. 3, а) свідчать, що для найглибшої точки контуру значення КІН є меншими на 2,10% але на поверхні зразка значення КІН для тріщини в зоні концентратора напружень є суттєво вищими – на 11,1%. Перевищення КІН у поверхневих точках тріщин в області концентраторів зберігається і при більших за розмірами поверхневих тріщинах.

Для оцінки КІН для поверхневих тріщин в зонах концентраторів застосовують, як правило, рівняння Ньюмена-Раджу [8], у які вводяться поправки, що враховують розподіл напружень в зонах концентраторів. Модифіковані рівняння для КІН при розтягу елемента з поверхневою тріщиною набувають вигляду [10]:

$$K_{I,A} = K_A \cdot K_{Si} \cdot M_K = \sigma_n \cdot \sqrt{\pi a} \frac{M}{\Phi} \cdot K_{Si} \cdot M_K, \quad (1)$$

$$K_{I,B} = K_B K_{Si} = \sigma_n \cdot \sqrt{\pi a} \frac{MS}{\Phi} \cdot K_{Si}, \quad (2)$$

де K_A, K_B – КІН, що визначаються за залежностями [8];

K_{Si} – коефіцієнт, що враховує концентрацію напружень в зоні концентратора;

M_K , – коефіцієнт, що враховує розподіл нелінійних напружень по товщині елемента.

Зазначимо, що для досліджуваних співвідношень $a/t \geq 0,15$ похибки оцінки КІН для тріщин при їх моделюванні для такого типу концентраторів не перевищують 4 %.

Оскільки значення КІН визначальним чином впливають на формування контуру поверхневої тріщини в процесі циклічного навантаження, проведеного експериментальні дослідження з оцінки росту тріщин в гладкому зразку та з концентратором напружень.

На рис. 4 наведено результати експериментальних досліджень зміни форми фронту поверхневої тріщини для випадків її розвитку у гладких зразках (однорідному полі напружень) – крива I та в зоні зварного з'єднання (неоднорідне поле напружень) – крива II. В обох випадках поверхневі тріщини ініціювались від штучного надрізу глибиною дисковою фрезою товщиною 0,13мм при циклічному навантаженні розтягом, що виникли у перетинах

зразків напруження $\sigma_n=(0,45\div 0,5) \sigma_T$. Коефіцієнт асиметрії циклу навантаження $R=0,25\div 0,3$. Зразки виготовлені зі сталі 09Г2С товщиною 20мм. Зварні з'єднання виконувалися вручну, електродами УОНИ-13/55.

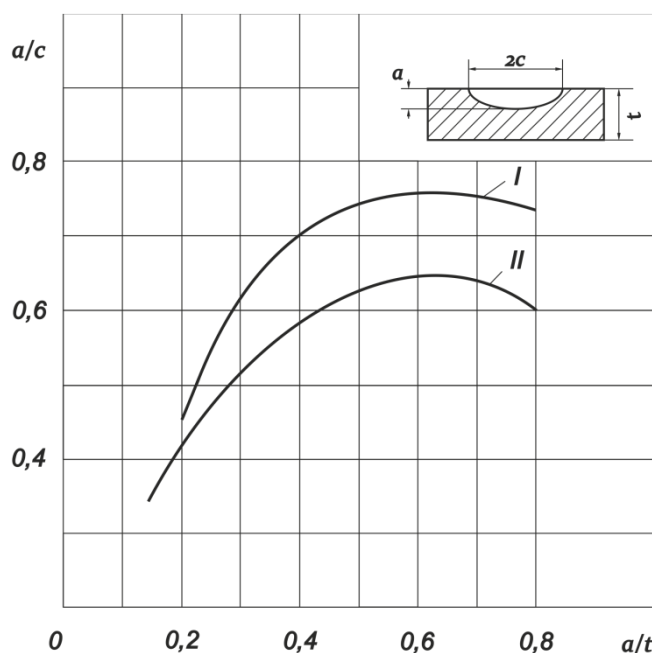


Рис. 4 – Кінетика форми поверхневих втомних тріщин: I – однорідне поле напружень; II – зварне з'єднання

Аналіз кінетики форми поверхневих тріщин в зоні концентратора напружень вказує на зменшення співвідношення півдіагоналей a/c до 18%. Це свідчить про суттєвий вплив неоднорідного напруження деформівного стану в зонах концентраторів напружень на форму поверхневої тріщини та живучість елемента конструкції в цілому.

ЛІТЕРАТУРА.

1. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев: Наук. думка, 2006. — 618 с.
2. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие : в 4-х т. /Под общ. ред. Панасюка В. В. – Киев: Наук. думка. – т. 2: Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами / Саврук. М. П. – 1988. – 620 с.
3. Карзов Г.П., Леонов В.П., Тимофеев Б.Т. Сварные сосуды высокого давления. – Л.: Машиностроение, 1982. – 287 с.
4. Fatigue strength of HSS steel butt-welded joints. Effects of microdefects and failure life predictions / Buirette C., Degallaix G., Claeys J., Menigault J. // Welding in the world, 1999. – vol. 43. – №3. – P. 27-37.
5. Особенности расчета коэффициентов интенсивности напряжений для поверхностных трещин, развивающихся у сварных швов / Підгурський Н. И., Барановский В. Н., Ляхов В. В., Підгурський И. Н. // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: зб. наук. пр. – Краматорськ., 2012. – №3(28). – С. 211-215.
6. Дослідження КІН двох взаємодіючих поверхневих півеліптичних тріщин методом скінченних елементів / П. Ясній, І. Підгурський // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2014. – № 2. – С. 15-25.
7. Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 456 с.
8. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. В 2-х томах / Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – 1016с.
9. Панасюк В. В., Сушинский А. И., Кацов К. Б. Разрушение элементов конструкций с несквозными трещинами – Киев: Наук. думка, 1991. – 172 с.
10. T. Wang, J.G. Yang†, X.S. Liu, Z.B. Dong, H.Y. Fang Stress intensity factor expression for butt joint with single-edge crack considering the effect of joint shape. – Materials & Design. V. 36, 2012 – P. 748-756.
11. І.М. Підгурський Вплив конструктивних концентраторів напружень на величину коефіцієнтів інтенсивності напружень вздовж контурів модельованих півеліптичних поверхневих тріщин // Вісник ДДМА. : зб. наук. пр. – Краматорськ., 2016. – №2(38). – С. 191-195.